

УДК 621.039.52.034.6:536.423

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЭЛОВ С НИТРИДНЫМ ТОПЛИВОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЯЖЕЛОАВАРИЙНОГО МОДУЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОДА ЕВКЛИД/V2

© 2023 г. Э. В. Усов\*, В. И. Чухно, И. А. Климонов,  
Д. П. Вепрев, Н. А. Мосунова, В. Ф. Стрижов

*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН), Москва, Россия*

*\*E-mail: usovev@gmail.com*

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 27.09.2023 г.

Принята к публикации 03.10.2023 г.

В работе представлены подходы, которые могут быть использованы для анализа поведения ТВЭЛов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом во время аварийных ситуаций, сопровождающихся термическим разрушением ТВЭЛов. Приведены результаты валидации на доступных в настоящее время данных. Оценена погрешность расчетов по результатам валидации. На базе валидированной модели представлены результаты численного исследования особенностей разрушения ТВЭЛов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом для условий аварий, характерных для реакторных установок с натриевым и свинцовым теплоносителями.

DOI: 10.31857/S0040364423060157

### ВВЕДЕНИЕ

В перспективных реакторах с жидкометаллическим теплоносителем (БРЕСТ-ОД-300, БН-1200М) в качестве основного типа топлива рассматривается смешанное нитридное уран-плутониевое (СНУП) топливо. Преимуществом нитридного топлива является его высокая теплопроводность, что позволяет эксплуатировать топливо при более низких температурах по сравнению с широко распространенным оксидным топливом. Недостатком нитридного топлива является его низкая химическая стабильность при высоких температурах, характерных для тяжелых аварий с потерей расхода теплоносителя и введением положительной реактивности.

Для численного исследования тяжелых аварий в реакторах с жидкометаллическим теплоносителем разработан интегральный код ЕВКЛИД/V2 [1]. Интегральный код содержит 15 модулей, которые используются для моделирования различных процессов, характерных для режимов нормальной эксплуатации, их нарушения, а также аварий, в том числе с повреждением активной зоны. Для расчетного анализа аварий с повреждением активной зоны применяются теплогидравлический модуль HYDRA-IBRAE/LM [2], твэльный модуль БЕРКУТ [3], трехмерный нейтронно-физический модуль DN3D [4] и тяжелоаварийный модуль SAFR [5, 6]. Последний позволяет выпол-

нить расчеты для задачи с термическим разрушением ТВЭЛов быстрого реактора, движением образовавшегося расплава, проплавлением чехла тепловыделяющей сборки (ТВС) и распространением плавления на соседние ТВС. Тяжелоаварийный модуль содержит специальные модели для расчета поведения нитридного топлива при высоких температурах.

Несмотря на свои достоинства, такие как высокие плотность и теплопроводность, позволяющие обеспечить более низкие температуры при эксплуатации, нитридное топливо обладает меньшей термохимической стабильностью. Многочисленные исследования, проведенные как в России, так и за рубежом, показали [7], что нитридное топливо при температурах до 2023–2073 К достаточно стабильное, а его диссоциация исключена при равновесном парциальном давлении азота до 1.3 Па. Таким образом, наличие небольшого количества азота под оболочкой ТВЭЛа стабилизирует нитрид до температур ~2073 К. Тем не менее в аварийных ситуациях температура топлива может достигать более высоких значений. По этой причине важно иметь валидированные модели и методики для предсказания поведения нитрида во время тяжелых аварий.

Цель настоящей работы – с использованием валидированных методик выполнить расчеты для задач с диссоциацией нитридного топлива в различных условиях.

## БАЗОВЫЕ МОДЕЛИ ТЯЖЕЛОАВАРИЙНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЭЛОВ С НИТРИДОМ УРАНА И СНУП ТОПЛИВОМ

Термическое разрушение ТВЭЛОВ наступает в ситуациях, когда скорость отвода тепла становится существенно меньше скорости его генерации в топливе. Событиями, которые могут приводить к серьезному нарушению баланса между подведенной и отведенной энергией в активной зоне реактора, являются резкое снижение расхода теплоносителя через зону из-за, например, потери электроснабжения и резкий рост мощности реакторной установки без срабатывания предусмотренных для таких случаев систем защиты реактора. В первом случае разрушение ТВЭЛа происходит из-за перегрева оболочки и ее расплавления вследствие ухудшения съема тепла. Во втором случае может произойти расплавление/диссоциация топлива из-за резкого роста энерговыделения в нем. Для определения температурного поля в аварийных условиях и моделирования плавления оболочки и топлива, а также его диссоциации в тяжелоаварийном модуле SAFR численно решается уравнение теплопроводности. В тяжелоаварийном модуле уравнение теплопроводности решается в энтальпийной формулировке с использованием метода конечных объемов [5]:

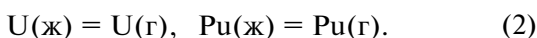
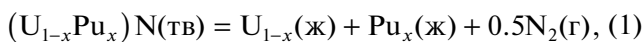
$$m \frac{h^{n+1} - h^n}{\Delta t} = q_E + q_W + q_N + q_S + Q \Delta V,$$

где  $q_E$ ,  $q_W$ ,  $q_N$ ,  $q_S$  – тепло (в Вт), поступающее в ячейку через левую, правую, верхнюю и нижнюю границы соответственно за счет теплопроводности;  $\Delta t$  – временной шаг на  $n$ -м слое (в с);  $h$  – удельная энтальпия (в Дж/кг);  $m$  – масса материала в расчетной ячейке (в кг);  $\Delta V$  – объем ячейки (в м<sup>3</sup>);  $Q$  – объемное энерговыделение (в Вт/м<sup>3</sup>);  $n$  – номер временного слоя. Правая часть уравнения аппроксимируется неявно.

Образовавшийся в результате плавления расплав может перемещаться под действием силы тяжести, трения с потоком теплоносителя, капиллярных сил, выталкивающей силы. Для перемещения расплава решаются уравнения сохранения массы, энергии и импульса [6].

В отличие от оксидного топлива, нитридное топливо плавится конгруэнтно только при превышении определенного парциального давления азота над его поверхностью. В противном случае вместо плавления наблюдается диссоциация топлива.

Базовая модель диссоциации нитрида урана и СНУП-топлива тяжелоаварийного модуля описана в работах [8, 9]. Рассматривается реакция диссоциации следующего вида:



При этом азот над поверхностью топлива появляется в результате реакции (1). Источником пара урана или плутония над поверхностью топлива является реакция (2).

В модели диссоциации СНУП-топлива предполагается, что скорости реакций (1), (2) существенно выше скорости отвода продуктов реакции от поверхности топлива. По этой причине скорость диссоциации ограничена скоростью массообменных процессов.

Расчет диссоциации выполняется для каждой граничной расчетной ячейки. Изменение массы СНУП за счет его разложения рассчитывается исходя из величины потока массы газообразного азота, образующегося при диссоциации  $j_{N_2}$ , и стехиометрии реакции (1):

$$\Delta m_{(Pu_xU_{1-x})N} = -2 \frac{M_{(Pu_xU_{1-x})N}}{M_{N_2}} j_{N_2} S \Delta t, \quad (3)$$

$\Delta t$  – расчетный шаг по времени,  $S$  – площадь поверхности,

$$j_{N_2} = \alpha_{N_2} \frac{M_{N_2}}{RT} (p_{N_2}(T) - p_{N_2\infty}) = j_{N_2}^{UN} + j_{N_2}^{PuN}, \quad (4)$$

где

$$j_{N_2}^{UN} = \alpha_{N_2} \frac{M_{N_2}}{RT} a_{UN} (1-x) p_{N_2}^{UN}(T), \quad (5)$$

$$j_{N_2}^{PuN} = \alpha_{N_2} \frac{M_{N_2}}{RT} a_{PuN} x p_{N_2}^{PuN}(T).$$

Здесь  $a_{PuN}$ ,  $a_{UN}$  – коэффициенты активности для UN и PuN в  $(U_{1-x}Pu_x)N$ , зависящие от доли плутония  $x$  [10];  $p_{N_2}^{UN}$ ,  $p_{N_2}^{PuN}$  – давление насыщения азота над поверхностью твердого нитрида урана и плутония при заданной температуре  $T$  [11, 12] соответственно;  $\alpha_{N_2}$  – коэффициент массоотдачи молекулярного азота;  $p_{N_2\infty}$  – парциальное давление азота на удалении от поверхности. Коэффициент массоотдачи рассчитывается исходя из подобия явлений массопереноса и теплообмена:

$$\alpha_{N_2} = \text{Sh} \frac{D_{N_2}}{d}.$$

Здесь Sh – безразмерный коэффициент массоотдачи (число Шервуда),  $d$  – диаметр таблетки топлива,  $D_{N_2}$  – коэффициент диффузии. Коэффициент диффузии атомов и молекул рассчитывается в зависимости от среды, с которой контактирует топливо: жидкая или газообразная фаза. Для газообразной фазы

$$D_i = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{k_B^3}{\pi^3}} \sqrt{\frac{N_A}{2M_g} + \frac{N_A}{2M_i}} \frac{4T^{3/2}}{p(d_i + d_g)^2}. \quad (6)$$

Здесь  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $d_i, d_g$  – диаметры  $i$ -го атома (молекулы) и атомов газообразной фазы;  $M_i, M_g$  – молярная масса  $i$ -й компоненты и газовой фазы соответственно;  $N_A$  – постоянная Авогадро.

Если топливо контактирует с жидким теплоносителем, то коэффициент диффузии молекул в жидкости может быть рассчитан с использованием соотношения Стокса–Эйнштейна

$$D_i = \frac{k_B T}{3\pi\mu_m d_i}, \quad (7)$$

где  $\mu_m$  – динамическая вязкость жидкой фазы.

В условиях вынужденной конвекции число Шервуда является функцией от чисел Рейнольдса и Шмидта и может быть рассчитано, например, по соотношению из [13]:

$$Sh = 2 + 0.95Re^{1/2}Sc^{1/3}.$$

При диссоциации СНУП-топлива образуются также жидкий уран и плутоний, которые остаются на поверхности. Часть урана и плутония может также испариться. Поэтому изменение массы урана и плутония рассчитывается как разность массы, образовавшейся в результате диссоциации, и массы, которая ушла с поверхности в виде паров.

Для жидкого урана

$$\Delta m_U = 2 \frac{(1-x)M_U}{M_{N_2}} j_{N_2} S \Delta t - j_U S \Delta t,$$

для жидкого плутония

$$\Delta m_{Pu} = 2 \frac{xM_{Pu}}{M_{N_2}} j_{N_2} S \Delta t - j_{Pu} S \Delta t.$$

Массовый поток пара урана

$$j_U = \alpha_U \frac{M_U}{RT} (p_U(T) - p_{U\infty}),$$

массовый поток пара плутония

$$j_{Pu} = \alpha_{Pu} \frac{M_{Pu}}{RT} (p_{Pu}(T) - p_{Pu\infty}),$$

где  $p_{Pu}(T), p_U(T)$  – давления насыщения плутония и урана над поверхностью нитрида. Коэффициенты массоотдачи рассчитываются по параметрам соответствующих атомов.

Изменение массы твердых и жидких материалов, оставшихся в ячейке, вычисляется по балансу:

$$\begin{aligned} \Delta m &= \Delta m_{(Pu_x U_{1-x})N} + \Delta m_U + \Delta m_{Pu} = \\ &= -(j_{N_2} + j_U + j_{Pu}) S \Delta t. \end{aligned}$$

Если под оболочкой ТВЭЛа присутствует азот с парциальным давлением  $p_{N_2\infty}$ , равным давлению насыщения азота при заданной температуре его поверхности, диссоциация и разложение топлива в соответствии с выражениями (3)–(5) по-

давлены. Подобное поведение может наблюдаться до момента разгерметизации ТВЭЛа, происходящей из-за механического или термического разрушения оболочки.

Можно также отметить, что, если температура СНУП-топлива выше температуры его конгруэнтного плавления и диссоциация подавлена за счет наличия азота с парциальным давлением над поверхностью выше, чем давление его насыщения, диссоциации не происходит. В этом случае топливо расплавляется. Модели для расчета образования расплава в тяжелоаварийном модуле аналогичны моделям, применяемым для оксидного топлива.

Для натриевого реактора во время тяжелых аварий к моменту начала разгерметизации ТВЭЛа натрий закипает и переходит в газообразное состояние, поэтому топливо контактирует с газовой фазой. Так как температура кипения свинцового теплоносителя (2022 К) почти на 900 К выше температуры кипения натрия (1153 К) и почти на 300 К выше температуры плавления нержавеющей стали [14], разгерметизация ТВЭЛа в реакторе со свинцовым теплоносителем приводит к контакту топлива и жидкой фазы. Используя формулы (6), (7), можно показать, что коэффициент диффузии молекул азота в газе на несколько порядков выше, чем в жидкости (рис. 1). Поэтому диссоциация в свинцовый теплоноситель за счет конвективно-диффузионного уноса молекул азота должна быть существенно подавленной по сравнению с натриевым теплоносителем. Уход азота за счет роста и уноса пузырей в жидкости также должен быть подавленным из-за того, что давление насыщенных паров азота при температуре кипения свинца в соответствии с [11] около 0.1 Па, что существенно меньше давления в корпусе реактора ( $\sim 10^5$  Па).

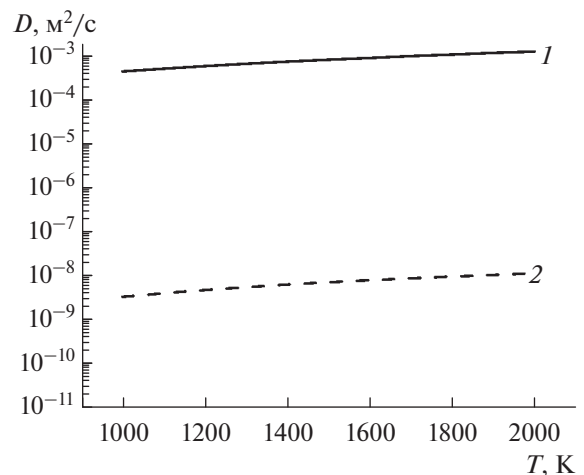


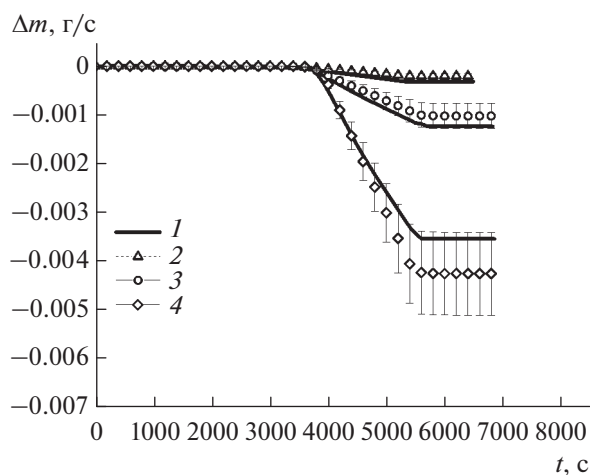
Рис. 1. Зависимость от температуры коэффициента диффузии  $D$  молекул азота в паре натрия (1) и молекула азота в жидком свинце (2).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВАЛИДАЦИИ ТЯЖЕЛОАВАРИЙНОГО МОДУЛЯ

В отличие от оксидного топлива экспериментальных данных, пригодных для валидации моделей термического разрушения нитридного топлива, в настоящее время не так много. Эксперименты по диссоциации выполнены при температурах не выше 2573 К. Высокотемпературные измерения температуры плавления нитрида урана и СНУП-топлива проводились локально методом лазерной вспышки [15]. В настоящее время во ФГУП НИТИ им. А.П. Александрова на установке “Расплав-3” проводятся эксперименты серии BR по исследованию взаимодействия ТВЭЛов со СНУП-топливом со свинцовым теплоносителем [16]. Большая часть данных, к сожалению, пока не представлена в открытой печати.

Эксперименты по изучению диссоциации СНУП-топлива и нитрида урана в газовую атмосферу проводились в АО ВНИИНМ [9] и НИЯУ МИФИ [17–21]. Результаты валидации тяжелоаварийного модуля интегрального кода на экспериментах НИЯУ МИФИ для нитрида урана представлены в работе [8]. Валидация на базе экспериментов АО ВНИИНМ приведена в [9]. Для примера на рис. 2 показано сравнение результатов расчета с учетом анализа неопределенности для экспериментов [9].

В обоих экспериментах исследовалась потеря массы образцами из СНУП-топлива (АО ВНИИНМ) и нитрида урана (НИЯУ МИФИ) при их изотермической выдержке в гелиевой атмосфере. Образцы помещались в тигель и нагревались. Изучалась зависимость скорости потери массы от температуры и площади поверхности образцов. В



**Рис. 2.** Результаты расчетной валидации экспериментов по определению потери массы из-за диссоциации СНУП-топлива от времени (АО ВНИИНМ): 1 – данные экспериментов; результаты расчетов: 2 –  $T = 1800^\circ\text{C}$ , 3 –  $1900^\circ\text{C}$ , 4 –  $2000^\circ\text{C}$ ; отрезки – неопределенности результатов расчетов.

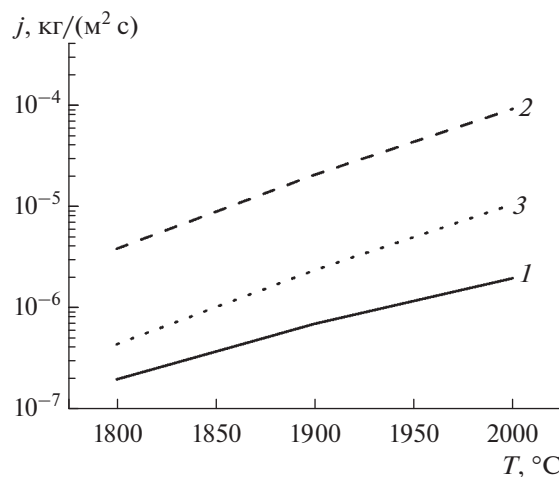
экспериментах НИЯУ МИФИ исследовалась скорость потери массы при температурах 2173, 2373, 2573 К. В АО ВНИИНМ эксперименты со СНУП-топливом состава  $\text{U}_{0.5}\text{Pu}_{0.5}\text{N}$  проводились при температурах 2173, 2273, 2373 К.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало работоспособность предложенных методик для расчета диссоциации нитридов в газовую атмосферу. В результате валидации обоснованы погрешности расчета скорости потери массы для нитрида урана – 34% и СНУП-топлива – 37%.

В результате проведенного анализа экспериментов показано, что для нитрида урана потеря массы определяется уходом молекулярного азота, для СНУП-топлива – испарением плутония, меньший вклад дает уход молекулярного азота, вклад от испарения урана существенно меньше (рис. 3). Данные выводы, полученные на основании расчетов, также согласуются с результатами анализа, выполненного в экспериментальных работах [9, 17–21].

Для валидации моделей поведения ТВЭЛов с нитридом урана [22] в свинцовом теплоносителе при быстром введении реактивности использованы результаты экспериментов, проведенных на импульсном графитовом реакторе (ИГР) [23].

Длительность наброса импульса в ИГР во время проведения этих экспериментов составляла около 1.5 с [22]. Исследовательская ампула, содержащая два модельных ТВЭЛа, помещалась в центральный экспериментальный канал ИГР. Модельный ТВЭЛ имел длину 87.5 мм, диаметр 7.2 мм. В качестве топлива использовался обогащенный нитрид урана. В первом ТВЭЛе обогащение достигало 10%, во втором – 2%. В зазоре меж-



**Рис. 3.** Результаты расчетов потоков массы различных компонентов газовой фазы в эксперименте, выполненном в АО ВНИИНМ: 1 – поток пара урана, 2 – пара плутония, 3 – молекул азота.

ду топливом и оболочкой располагался свинец (в качестве жидкого подслоя, улучшающего теплоотдачу от топлива к оболочке).

Результаты расчетов и экспериментов по изменению температуры в исследовательской ампуле приведены на рис. 4. При анализе экспериментальных данных выяснено, что свинец в пространстве между топливом и оболочкой закипел. Это свидетельствует о достижении топливом температуры выше 2023 К и подтверждается результатами расчетов (рис. 4в). Разрушенные топливные частицы оплавлены по краям, что может свидетельствовать как о плавлении топлива, так и о возможной его диссоциации. Однозначного вывода о плавлении/диссоциации сделать нельзя, поскольку спектрометрических исследований не проводилось. По результатам расчетов определена среднеарифметическая погрешность расчета максимальной температуры, которая составила для оболочки 180 К, для свинца – 40 К.

Результаты валидации демонстрируют возможность использования интегрального кода ЕВКЛИД/V2 для моделирования процессов с термическим разрушением в ТВЭЛах с нитридом урана и СНУП-топливом.

Несмотря на наличие доступных экспериментальных данных, требуется проведение дополнительных исследований по изучению диссоциации

СНУП-топлива при температурах существенно выше 2573 К как в атмосфере паров натрия, так и в свинцовом теплоносителе с имитациями аварий с набросом мощности и потерей расхода теплоносителя.

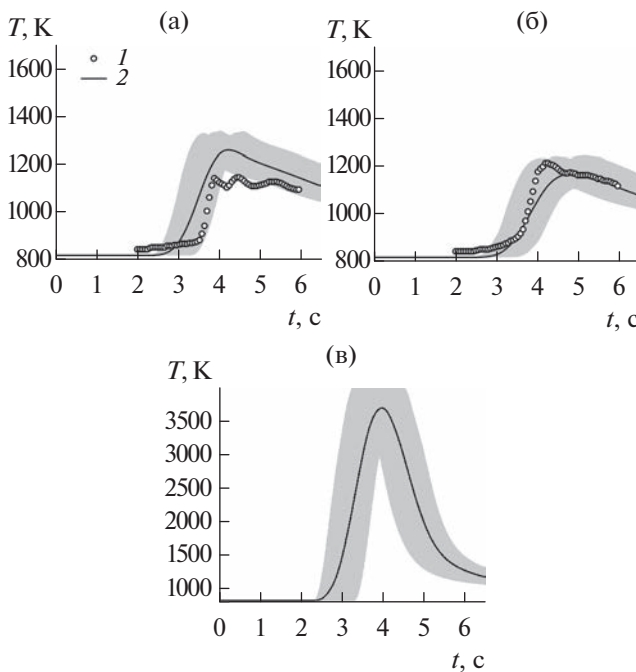
### ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЭЛОВ

Поскольку в настоящее время отсутствуют детальные данные о поведении нитридного топлива в аварийных условиях, на основании разработанных и валидированных подходов проведено исследование особенностей разрушения ТВЭЛОВ в условиях, приближенных к авариям в реакторных установках с натриевым и свинцовым охлаждением. Наиболее тяжелые аварии сопровождаются расплавлением оболочки ТВЭЛа и контактом топлива и теплоносителя.

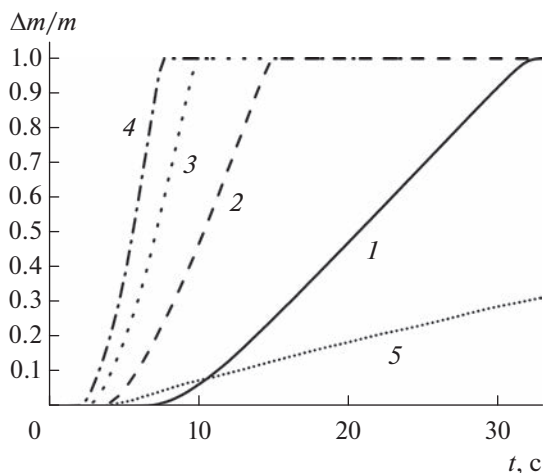
Для натриевого теплоносителя расплавление оболочки происходит после вскипания натрия и наступления кризиса теплообмена. Для свинцового – из-за более высокой температуры кипения расплавление оболочки происходит до начала закипания. Поэтому в случае натриевого теплоносителя рассматривалась диссоциация в атмосферу паров натрия, в случае свинцового – диссоциация в жидкий теплоноситель. Эффекты, связанные с процессами до расплавления оболочки и во время ее расплавления, в настоящей работе не рассматривались.

Для численного анализа подготовлена расчетная схема, которая содержала модель топливного столба, охлаждаемого либо потоком пара натрия, либо жидким свинцом. Диаметр топливного столба равен 7.9 мм, длина – 84 см. Размеры топливного стрежня также выбраны близкими к размерам реальных топливных стержней быстрых реакторов. Температура натриевого теплоносителя на входе равнялась 1300 К, скорость – 150 м/с. Данные параметры близки к параметрам, характерным для аварии в натриевом реакторе. Покоящийся свинцовый теплоноситель имел начальную температуру 1703 К, равную температуре плавления оболочки в соответствии с данными справочника [14]. Номинальное линейное энерговыделение было равно 35 кВт/м. Рассматривались также случаи энерговыделения в два–четыре раза больше номинального, что соответствует росту мощности в аварии с вводом положительной реактивности.

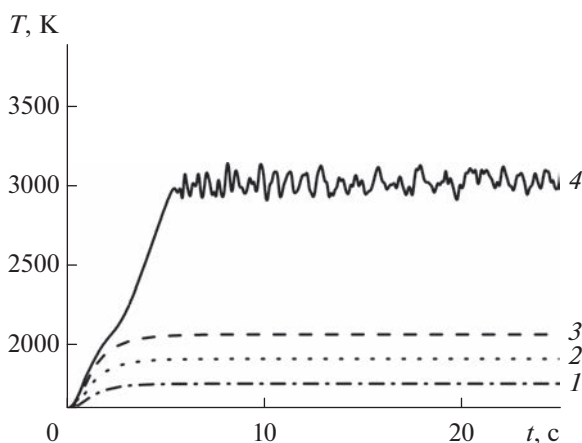
На рис. 5 приведены результаты расчетов потери массы. Как можно заключить из их анализа, диссоциация в среде паров натрия начинается уже при номинальной мощности. Для свинцового теплоносителя потеря массы наблюдается только при мощности в четыре раза больше номинальной. Связано это с достижением температуры плавления нитрида в этих условиях (рис. 6). Потеря массы в данном случае обусловлена не дис-



**Рис. 4.** Сравнение результатов расчета температуры оболочки ТВЭЛа (а), теплоносителя (б), топлива (в) и экспериментальных данных, полученных на реакторе ИГР для UN-топлива: 1 – эксперимент, 2 – расчет при номинальных параметрах, серый – диапазон неопределенности расчетных данных.



**Рис. 5.** Результаты расчетов потери массы для UN-топлива: 1 – номинальная мощность, натрий; 2 – удвоенная номинальная мощность, натрий; 3 – утроенная номинальная мощность, натрий; 4 – учетверенная номинальная мощность, натрий; 5 – учетверенная номинальная мощность, свинец.



**Рис. 6.** Максимальная температура поверхности UN-топлива для свинца: 1 – номинальная мощность, 2 – удвоенная номинальная мощность, 3 – утроенная номинальная мощность, 4 – учетверенная номинальная мощность.

социацией нитрида, а уносом расплава нитрида, при меньших температурах диссоциация в случае свинцового теплоносителя подавлена. Результаты расчетов подтверждают ожидаемое поведение нитрида в условиях аварий для натриевого и свинцового теплоносителей. Тем не менее существует необходимость получения более детальной экспериментальной информации при температурах выше 2573 К.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена модель поведения нитридного топлива при высоких температурах, реализованная в тяжелоаварийном модуле интегрального

кода ЕВКЛИД/V2. Рассмотренные модели валидированы на доступных данных экспериментов, в которых изучалось поведение нитридного топлива и ТВЭЛов с нитридным топливом в условиях аварий в быстрых реакторах. С использованием валидированной модели проведены сравнительные расчеты поведения топлива в условиях реакторов с натриевым и свинцовым теплоносителями. Результаты расчетов подтверждают гипотезу о том, что для условий реактора со свинцовым теплоносителем нитридное топливо начинает разрушаться при существенно более высоких энерговыделениях, чем в натриевом теплоносителе. Для подтверждения результатов расчетов требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Работа выполнена в рамках госконтракта № Н.4о.241.19.21.1068 от 14.04.2021 “Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов, проектирования атомных электростанций, создания технологий и объектов ядерного топливного цикла. Этап 2021–2023 гг.”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бутов А.А., Жданов В.С., Климонов И.А. и др.* Физические модели для расчета разрушений твэла и активной зоны реактора с жидкометаллическим теплоносителем, реализованные в коде ЕВКЛИД/V2 // Теплоэнергетика. 2019. № 5. С. 5.
2. *Алипченков В.М., Анфимов А.М., Афремов Д.А. и др.* Базовые положения, текущее состояние разработки и перспективы дальнейшего развития теплогидравлического расчетного кода нового поколения HYDRA-IBRAE/LM для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах // Теплоэнергетика. 2016. № 2. С. 54.
3. *Veprev D.P., Boldyrev A.V., Chernov S.Y., Mosunova N.A.* Validation and Validation of the Berkut Fuel Rod Module of the EUCLID/V1 Integrated Computer Code // Ann. Nucl. Energy. 2018. V. 113. P. 237.
4. *Koltashev D.A., Stakhanova A.A.* Neutronic Calculation of Fast Reactors by the EUCLID/V1 Integrated Code // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 781. P. 012003.
5. *Усов Э.В., Бутов А.А., Чухно В.И. и др.* Моделирование плавления твэла быстрого реактора и затвердевания образующегося расплава с помощью модуля SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Атомная энергия. 2018. Т. 124. № 3. С. 123.
6. *Усов Э.В., Бутов А.А., Чухно В.И. и др.* Моделирование перемещения расплава по поверхности твэла быстрого реактора при тяжелой аварии с помощью модуля SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Атомная энергия. 2018. Т. 124. № 4. С. 197.
7. *Розогкин Б.Д., Степеннова Н.М., Бергман Г.А., Прошкин А.А.* Термохимическая стабильность, изготвление и регенерация моноснитридного топлива // Атомная энергия. 2003. Т. 95. Вып. 6. С. 428.
8. *Усов Э.В., Чухно В.И., Кудашов И.Г., Сычева Т.В.* Модель для расчета скорости диссоциации нит-

- ридного топлива при высоких температурах // ТВТ. 2020. Т. 58. № 2. С. 238.
9. *Krivov M.P., Kireev G.A., Tenishev A.V. et al.* Thermogravimetric Study of Mixed Uranium–Plutonium Fuel for Prospective Generation IV Reactors // *J. Nucl. Mater.* 2022. V. 567. 153798.
  10. *Suzuki Ya., Maeda A., Arai Ya., Ohmichi T.* Vaporization Behavior of Uranium–Plutonium Mixed Nitride // *J. Nucl. Mater.* 1992. V. 188. P. 239.
  11. *Hayes S.L., Thomas J.K., Peddicord K.L.* Material Property Correlations for Uranium Mononitride IV. Thermodynamic Properties // *J. Nucl. Mater.* 1990. V. 171. P. 300.
  12. *Olson W.M., Mulford R.N.R.* The Decomposition Pressure and Melting Point of Uranium Mononitride // *J. Phys. Chem.* 1963. V. 67. № 4. P. 952.
  13. *Garner F.H., Suckling R.D.* Mass Transfer from a Soluble Solid Sphere // *AIChE Journal.* 1958. V. 4. № 1. P. 114.
  14. *Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: ИздАт, 2007. 200 с.
  15. *Carvajal U., Prieur D., Bohler R., Manara D.* Melting Point Determination of Uranium Nitride and Uranium Plutonium Nitride: A Laser Heating Study // *J. Nucl. Mater.* 2014. V. 449. P. 1.
  16. *Альмяшев В.И., Хабенский В.Б., Крушинов Е.В. и др.* Экспериментальное исследование высокотемпературного взаимодействия стали со свинцовым теплоносителем // ТВТ. 2021. Т. 59. № 5. С. 762.
  17. *Баланкин С.А., Лошманов Л.П., Скоров Д.М., Соколов В.С.* Термодинамическая стабильность моонитрида урана // *Атомная энергия.* 1978. Т. 44. № 4. С. 327.
  18. *Lunev A.V., Mikhhalchik V.V., Tenishev A.V., Baranov V.G.* Kinetic and Microstructural Studies of Thermal Decomposition in Uranium Mononitride Compacts Subjected to Heating in High-purity Helium // *J. Nucl. Mater.* 2016. V. 475. P. 266.
  19. *Baranov V.G., Lunev A.V., Mikhhalchik V.V., et al.* High Temperature Behavior of Simulated Mixed Nitrides // *IOP Conf Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2016. V. 130. P. 012022.
  20. *Baranov V.G., Tenishev A.V., Kuzmin R.S. et al.* Thermal Stability Investigation Technique for Uranium Nitride // *Ann. Nucl. Energy.* 2014. V. 87(2). P. 784.
  21. *Mikhhalchik V.V., Tenishev A.V., Baranov V.G., Kuzmin R.S.* High Temperature Uranium Nitride Decomposition // *Adv. Mater. Res.* 2014. V. 1040. P. 47.
  22. *Вурум А.Д., Жданов В.С., Зверев В.В. и др.* Результаты испытаний модельных твэлов реактора типа БРЕСТ-300 в реакторе ИГР // *Вестн. НЯЦ РК.* 2000. Вып. 1. С. 25.
  23. *Курчатов И.В., Фейнберг С.М., Долежалъ Н.А. и др.* Импульсный графитовый реактор ИГР // *Атомная энергия.* 1964. Т. 17. № 6. С. 463.